

Министерство образования и науки РФ

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УДК

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке
_____ Кружаев В.В.
«__» _____ 2013

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках выполнения п.1.2.2.3 Плана реализации мероприятий Программы развития
УрФУ на 2013 год

ПО ТЕМЕ:

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СЛОИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ
СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ: СТРУКТУРА, СВОЙСТВА, ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ

(Заключительный)

Зав.кафедрой

(подпись, дата)

_____ Гervashev M.A.

Научный руководитель

(подпись, дата)

_____ Мальцева Л.А.

Исполнитель

(подпись, дата)

_____ Тюшляева Д.С.

Екатеринбург 2013

Реферат

1. ФИО автора: Тюшляева Д.С. (Tyushlyayeva Daria)
2. Аннотация: Исследованы структура, морфология, микротвердость переходной зоны многослойных металлических композиционных соединений, а также прочность сцепления соединяемых пластин, механические свойства получаемых композитов и фрактограммы изломов. В качестве соединяемых материалов выбраны тонкие (толщиной 0,1–1 мм) пластины из алюминиевого сплава Д16, высокопрочной мартенситно-старееющей стали ЗИ90-ВИ (03Х12Н9К4М2ЮТ), бериллиевой бронзы БрБ2 и титанового сплава ОТ4-1. Показана возможность получения композиций из разнородных материалов методом сварки взрывом. Установлена зависимость формы (гладкая или волнообразная) границы раздела от физико-механических свойств свариваемых металлов. Показано, что формирование волнообразной границы приводит к образованию в переходных зонах областей интенсивного перемешивания. Обсуждаются возможные механизмы сцепления слоев.

Structure, morphology, interface region microhardness of laminar metal composite, and also bonding strength of joining plates, mechanical properties of produced composites and fractographs has been investigated. Thin (thickness of 0,1-1 mm) plates from an aluminum alloy of Д16, high-strength maraging steel ЗИ90-ВИ (03Х12Н9К4М2ЮТ), beryllium bronze БрБ2 and a titanium alloy ОТ4-1 are chosen as joining materials. Possibility of composite production from dissimilar materials by methods of explosion welding was shown. Dependence of form of bonding interface from physical-mechanical properties of welding materials was established. It is shown that occurrence of wavy interface lead to formation of intense mixing region in transition zones. Possible mechanisms of bonding layers are discussed.

3. Ключевые слова: сварка взрывом, мартенситно-старееющая сталь, многослойный металлический композит, поверхность раздела. Explosion welding, maraging steel, laminar metal composite (sandwich-type composite), interface region.
4. Тема отчета: Металлические слоистые композиционные материалы, полученные сваркой взрывом: структура, свойства, особенности переходной зоны. Metal laminar composites produced by explosion welding.

Введение

Сварка взрывом представляет собой высокоинтенсивное кратковременное воздействие и позволяет получать многослойные композиционные материалы с улучшенными свойствами, в том числе прочностными, коррозионно-стойкими, жаропрочными. Именно структура переходной зоны определяет прочность соединения свариваемых материалов, поэтому именно она обычно является объектом исследования. На сегодняшний день существует много мнений относительно природы прочности соединения при сварке взрывом. Исследователи, работающие в данной области, не пришли к единому мнению в этом вопросе: обсуждаются такие гипотезы, как локальное расплавление свариваемых материалов в переходной зоне с последующим их перемешиванием; интенсивная пластическая деформация приграничных слоев; образование новых фаз, и др. По-видимому, отсутствие единого мнения о структурных изменениях в переходной зоне связано с физико-механическими свойствами соединяемых материалов, их размерами (толщиной) и параметрами сварки.

Целью настоящей работы являлось изучение структуры зоны соединения, переходной зоны многослойных композиций из разнородных металлических материалов, полученных сваркой взрывом, прочности соединения и механизма сцепления слоев.

1. Материалы и методика исследований

В качестве соединяемых материалов выбраны пластины алюминиевого сплава Д16 (дюраль), высокопрочной мартенситно-старееющей стали ЗИ90-ВИ (03Х12Н9К4М2ЮТ), бериллиевой бронзы БрБ2 (относится к термически упрочняемым бронзам) и титанового сплава ОТ4-1. Химический состав исходных материалов приведен в табл.1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых материалов

Материал	C	Cr	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cu	Mn	Be	Mg	Fe
ЗИ90-ВИ	≤0,03	12,5	9,4	3,57	2,3	0,44	0,23	-	≤0,2	-	-	Основа
Д16	-	0,08	-	-	-	-	Основа	4,9	0,3	-	1,42	0,30
БрБ2	-	-	0,2	-	-	-	-	Основа	-	2,0	-	-
ОТ4-1	-	-	-	-	-	Основа	1,7	-	1,2	-	-	-

Сваривали пакеты из разнородных материалов: трех и пяти чередующихся пластин сплава Д16 и стали ЗИ90-ВИ (верхняя и нижняя пластины – дюраль); пятислойный пакет из бронзы БрБ2 и стали ЗИ90-ВИ (верхняя и нижняя пластины – БрБ2); пятислойный пакет, собранный в последовательности сталь ЗИ90-ВИ, сплав ОТ4-1, сплав Д16, сплав ОТ4-1, сталь ЗИ90-ВИ. Размер пластин в плане 200×70 мм, толщина пластин из дюралья

составляла $\approx 1,0$ мм, стали ЗИ90-ВИ – 0,20 мм, бронзы БрБ2 – 0,13 мм, сплава ОТ4-1 – 1,0 мм. Параметры сварки: угол соударения 20° , скорость детонации 2450 м/с, скорость соударения 850 м/с. Высота слоя взрывчатого вещества 20 мм (использовали смесь аммиачной молотой селитры с древесной мукой - динамон).

Материалы перед сваркой были подвергнуты термической обработке: пластины из мартенситно-старееющей стали ЗИ90-ВИ – закалке в воду от 1000°C (выдержка 20 мин); нагартованный лист из сплава Д16 – отжигу при 350°C , 30 мин; прокатанный при температуре 980°C сплав ОТ4-1 – отжигу при 650°C , 30 мин; лента из бронзы БрБ2 после холодной пластической деформации – закалке от 800°C (выдержка при нагреве 20 мин).

Металлографический анализ осуществляли с применением оптического микроскопа OLYMPUS GX-51. Микрорентгеноспектральный анализ проводили на растровом электронном микроанализаторе Philips SEM 535, оснащенный приставкой Jeol JSM-649LV с системой микроанализа Oxford Instruments Inca Energy 350.

Микротвердость слоев по сечению композита измеряли с помощью микротвердомера Micromet при нагрузке 0,1 Н.

Испытания на одноосное статическое растяжение и циклический знакопеременный изгиб выполняли, используя образцы: длиной 100 мм и шириной $b = 2a + 10$ мм, где a – толщина, соответствующая толщине многослойного композита. Образцы вырезали из полученных композитов в направлении вдоль фронта волны. Механические испытания проводили на разрывной машине Instron 3380 в соответствии с ГОСТ 1497–84. Испытания на циклический знакопеременный изгиб для оценки прочности сцепления слоев выполняли до разрушения.

Для фрактографических исследований поверхности изломов образцов после испытания на статическое растяжение и знакопеременный изгиб использовали растровый электронный микроскоп Philips SEM 535 (ускоряющее напряжение 25 кВ).

2. Результаты исследования и их обсуждение

2.1. Структура и свойства материалов в исходном состоянии

После закалки от температур однофазной γ -области (1000°C) структура стали ЗИ90-ВИ состоит практически из 100% мартенсита замещения, или реечного (рис. 1, а). Микроструктура закаленного сплава БрБ2 состоит из зерен α -твердого раствора бериллия в меди; в некоторых зернах могут присутствовать двойники закалочного охлаждения (рис. 1, б). Сплав ОТ4-1 (система Ti–Al–Mn) по структуре относится к классу псевдо- α , его структура при комнатной температуре представлена α -фазой глобулярного типа (светлого цвета на рис. 1, в) и небольшим количеством β -фазы вследствие

дополнительного легирования марганцем. В структуре алюминиевого сплава Д16 основной фазой является α -твердый раствор, состоящий из атомов меди и алюминия и имеющий ГЦК-решетку (рис. 1, *з*). Механические свойства исходных материалов приведены в табл.2.

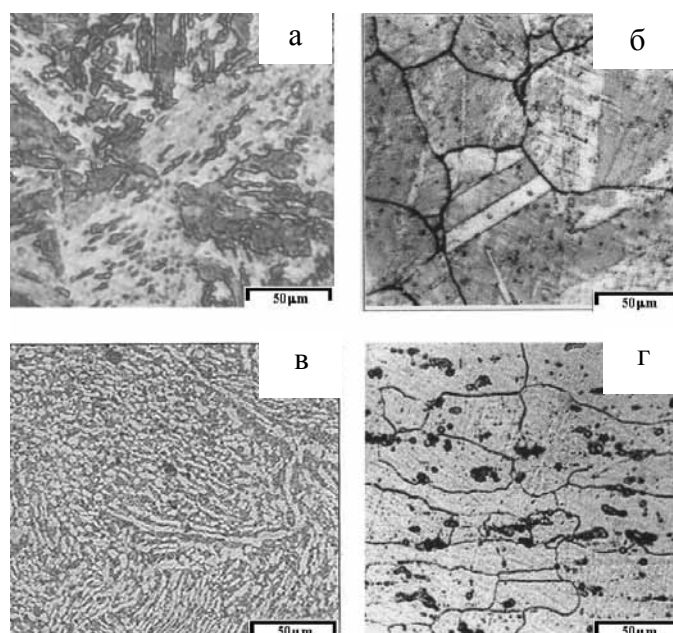


Рисунок 1 - Микроструктура материалов в исходном состоянии:

а – сталь ЗИ90-ВИ (закалка от 1000 °С); *б* – БрБ2 (закалка от 800° С); *в* – сплав ОТ4-1 (отжиг 650 °С, 30 мин.); *з* – сплав Д16 (отжиг 650° С ,30 мин.)

Таблица 2 – Механические свойства и твердость исходных материалов

Материал	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	HV ₁₀
ЗИ-90	980	860	10	350
Д16	130	50	20	77
БрБ2	410	н.д.	30	125
ОТ4-1	590	470	22	290

2.2. Трехслойный композит из сплава Д16 и стали ЗИ90-ВИ

В композите Д16–ЗИ90-ВИ–Д16 граница раздела между материалами плоская (рис. 2, *а*), неровности поверхности также практически не наблюдаются. Такой результат обусловлен выбранным режимам сварки, которые соответствуют так называемой «нижней границе». При таких режимах волнообразование может не происходить. Число Рейнольдса для настоящих экспериментов $Re \approx 7$, что значительно меньше критического $Re \geq 10$, необходимого для волнообразования.

Вдоль границы соединения со стороны дюрала сформирована более светлая переходная зона толщиной 30-40 мкм, по составу представляющая собой сплав Д16, несколько обедненный легирующими элементами (см. рис. 2, *а*).

Микротвердость сплава Д16 после сварки составляет $\approx 200 \text{ HV}_{10}$, что выше, чем в исходном состоянии (см. табл. 2). Микротвердость стали ЗИ90-ВИ также повысилась и составила 500 HV_{10} . В переходной зоне при подходе к границе раздела выявлено снижение микротвердости ($\Delta \text{HV}_{10} = 50\text{--}80$). Механические свойства композита несколько ниже, чем для стали ЗИ90-ВИ, но выше, чем для сплава Д16, и составляют: $\sigma_b = 570 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 460 \text{ МПа}$, $\delta = 9\%$. Образцы композита разрушались после 5-7 знакопеременных изгибов без расслоений, механизм разрушения – вязкий.

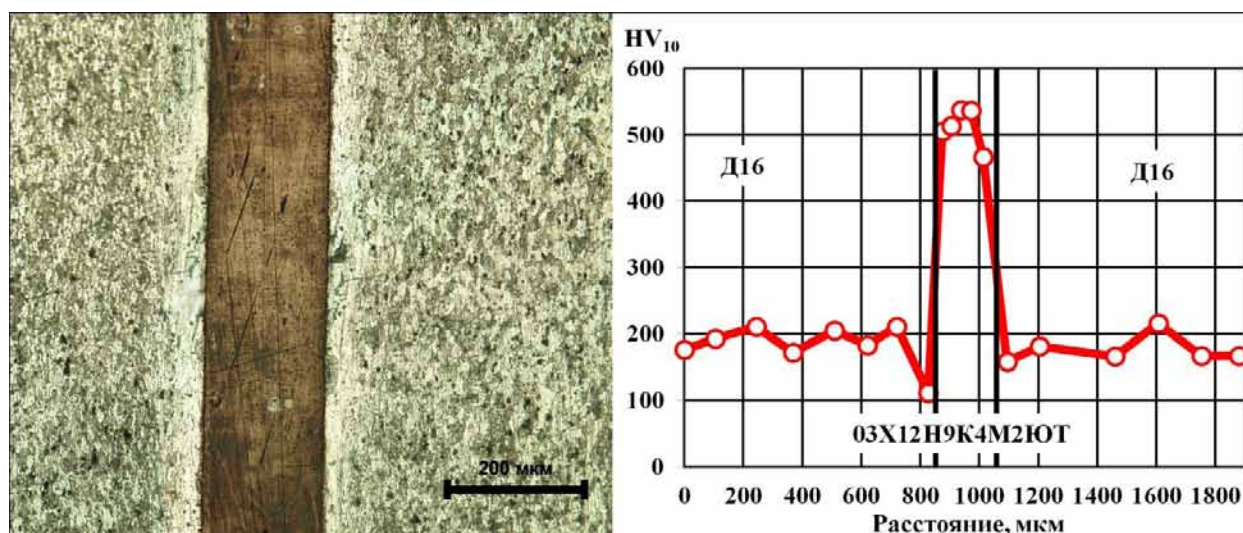


Рисунок 2 – Структура поперечного сечения трехслойного композита Д16-ЗИ90-ВИ-Д16 (а) и распределение микротвердости по его сечению (б)

2.3. Пятислойный композит из сплава Д16 и стали ЗИ90-ВИ

Границы раздела в пятислойном композите практически плоские, неровности незначительные. С обеих сторон границ контактных поверхностей алюминий–сталь сформирована узкая (толщиной 15–25 мкм) переходная зона (рис. 3-5). Ей предшествует очень узкий ($\approx 2,0 \text{ мкм}$) слой, в структуре которого обнаружены небольшие островки светлого цвета (рис. 5, б) – предположительно, интерметаллические включения или попавший в результате перемешивания металл соединяемых слоев. Этот слой отличается пониженным ($\approx 85 \text{ ат. \%}$) содержанием алюминия относительно дюрала, в его состав входят также железо, хром и никель. (Подобный тонкий приграничный слой с «островками» в трехслойном композите обнаружен не был.) Микротвердость этой зоны из-за ее малых размеров определить не удалось.

Результаты послойного микрорентгеноспектрального анализа показали незначительные отклонения состава сваренных слоев от исходного (см. табл. 1 и рис. 4,а). Микротвердость материалов в пятислойном композите такая же, как и в трехслойном: 200 HV_{10} у дюрала и 500 HV_{10} у стали (рис.4, б). На приконтактных со сталью участках наблюдается понижение микротвердости, что свидетельствует об образовании, скорее,

зоны перемешивания, чем зоны интерметаллидных соединений, так как они отличаются повышенной твердостью. Образцы композита разрушались после 7–10 знакопеременных изгибов без расслоений, механизм разрушения – вязкий ямочный во всех зонах по сечению композита (рис. 6).

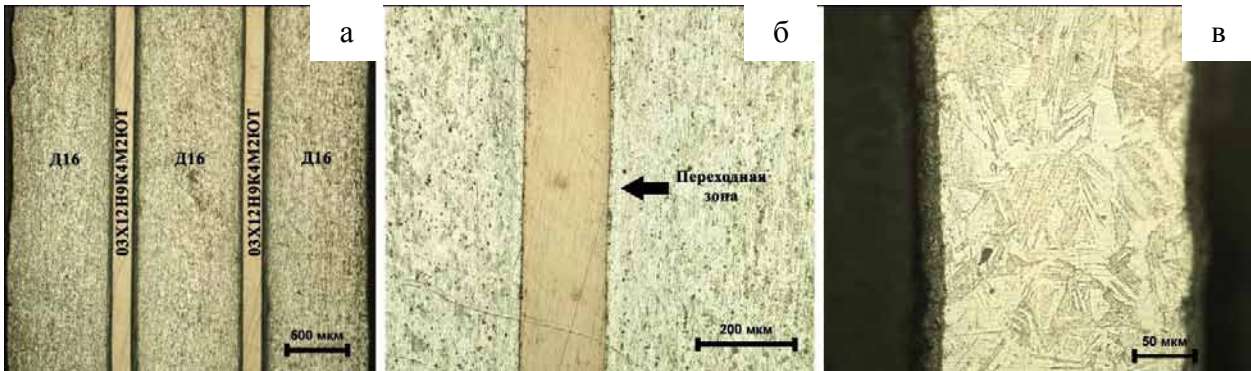


Рисунок 3 – Форма границы раздела и переходная зона в поперечном сечении пятислойного композита из сплава Д16 и стали ЗИ90-ВИ (травление различными реактивами)

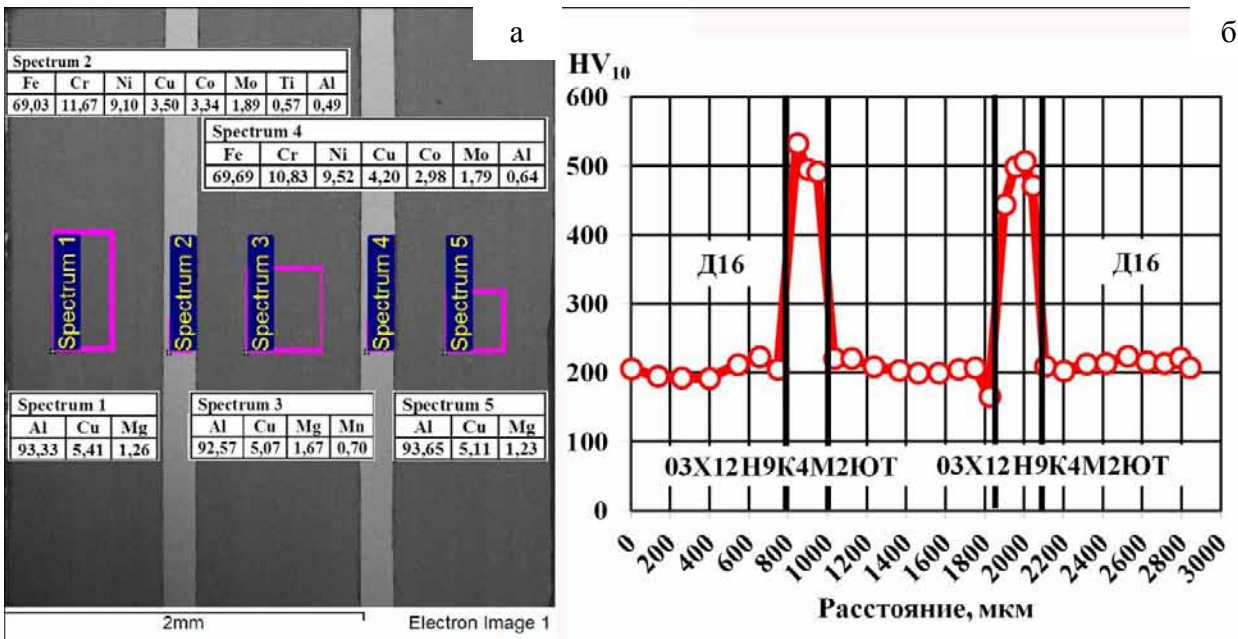


Рисунок 4 – Результаты послойного микрорентгеноспектрального анализа (а) и распределение микротвердости по сечению (б) пятислойного композита из сплава Д16 и стали ЗИ90-ВИ

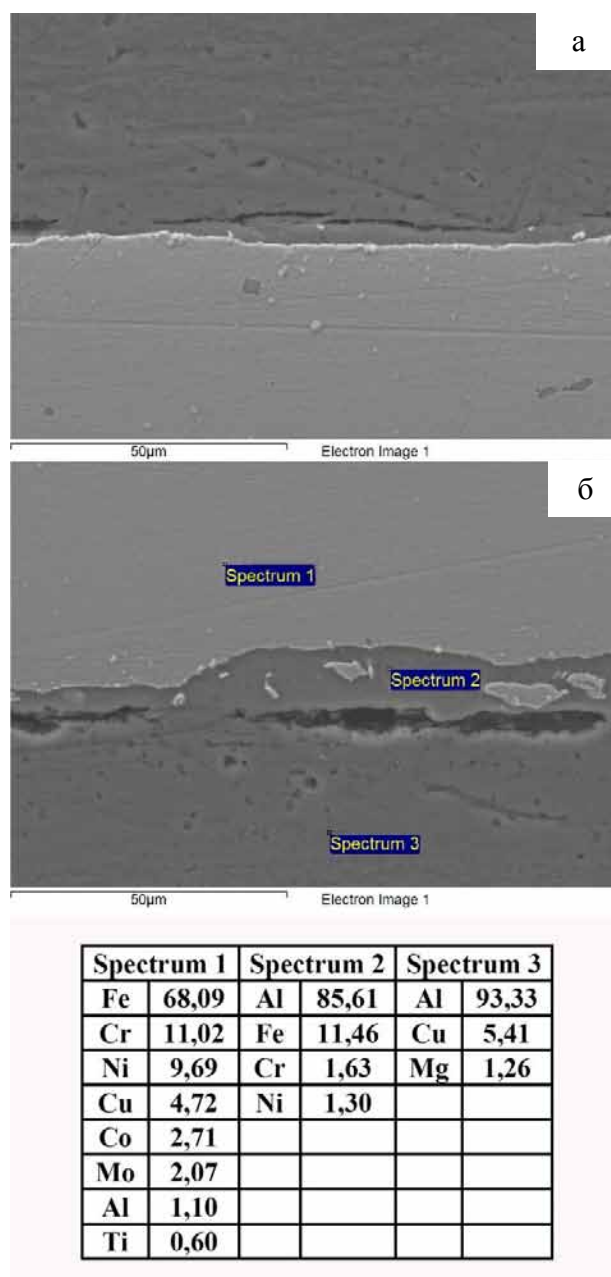


Рисунок 5 – Продольное сечение границы раздела сплав Д16 – сталь ЗИ90-ВИ:
а – сканирующая электронная микроскопия во вторичных электронах; б – растровая
электронная микроскопия в обратно-рассеянных электронах и данные
микрорентгеноспектрального анализа

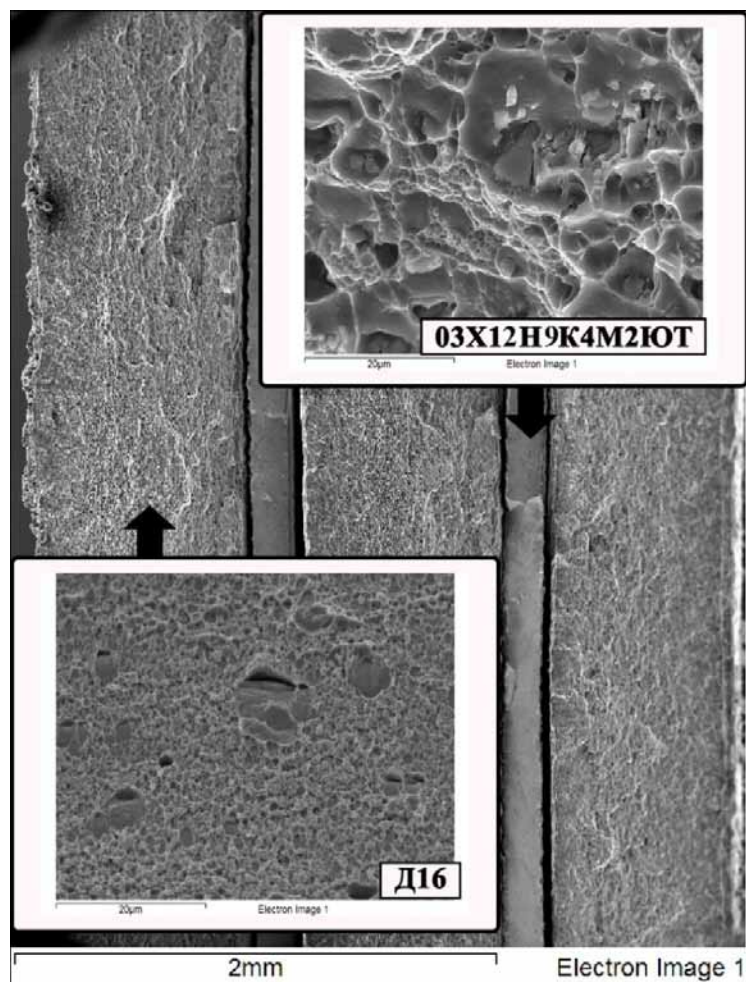


Рисунок 6 - Фрактограммы излома образца пятислойного композита из сплава Д16 и стали ЗИ90-ВИ после знакопеременного изгиба

2.4. Пятислойный композит из сплава БрБ2 и стали ЗИ90-ВИ

Форма границ раздела многослойного композита из сплава БрБ2 и стали ЗИ90-ВИ - волнообразная, вблизи нее наблюдаются зоны частичного оплавления (рис. 7). Выступы на поверхностях раздела принадлежат более твердому материалу – стали, и направлены они в более мягкий материал – бронзу. Амплитуда и длина волны границ раздела изменяются по толщине образца: по мере продвижения от верхних сварных швов к нижним амплитуда и длина волны уменьшаются с 304 и 94 мкм до 94 и 23 мкм соответственно.

Незначительное различие в плотностях соударяющихся пар привело к изменению режима соударения, при этом число Рейнольдса $Re \geq 10$, а следовательно, возможно волнообразование. Известно также, что волнообразование может быть вызвано механическим перемешиванием, в результате которого увеличивается поверхность соприкосновения соединяемых металлов и их сцепление улучшается. Существует мнение, что физической природой образования волнообразных контактных поверхностей при сварке взрывом является возникновение сдвиговых и ротационных мод пластического

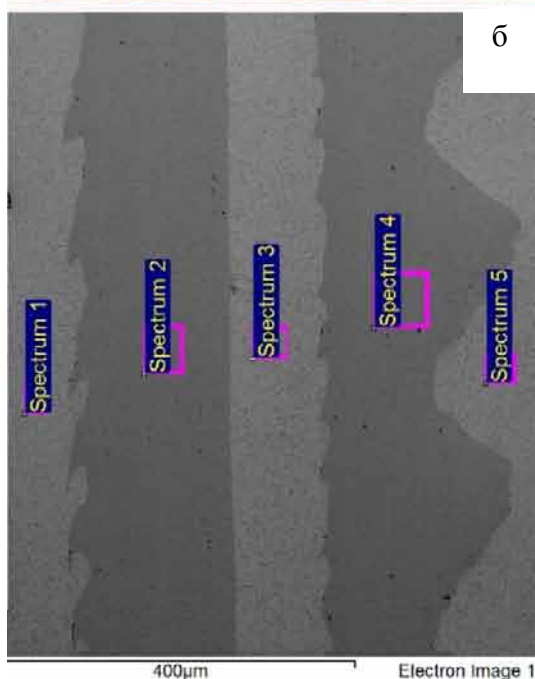
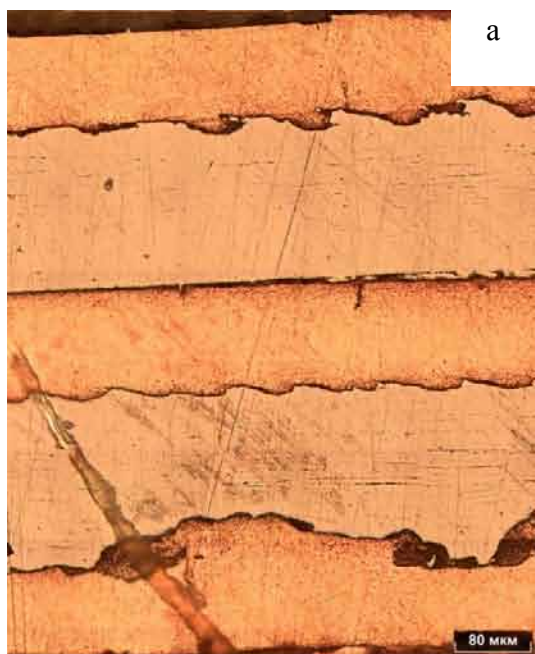
течения металла, одновременно реализующихся на микро-, мезо- и макроуровне. При этом могут наблюдаться участки с частичным оплавлением вдоль границ раздела в местах, являющихся основанием волн и образующихся завихрений, которые испытывали наиболее высокую интенсивную пластическую деформацию.

Согласно результатам микрорентгеноспектрального анализа, участки темно-серого цвета на границах раздела образованы в результате интенсивного перемешивания стали и бериллиевой бронзы. Зона перемешивания содержит 41,5% Fe; 40,5% Cu; 6,5% Cr; 6,0% Be и 5,4% Ni, т.е. бериллий полностью перешел из бронзы в эту зону (рис. 8).

Таким образом, в процессе сварки взрывом через границу раздела происходит интенсивный массоперенос, в результате которого образуются области взаимного проникновения посредством как чрезвычайно высоких степеней деформации, приводящих к волнообразованию с большим количеством выступов твердого материала в мягком, так и локального расплавления и интенсивного перемешивания легирующих элементов. Ввиду кратковременности процесса сварки взрывом образование областей интенсивного перемешивания в переходных зонах, по-видимому, получить за счет диффузионных перемещений атомов на столь большие расстояния невозможно, так же как и в результате интенсивной пластической деформации без локального расплавления. При сварке взрывом материалов с различными физико-механическими свойствами в металлах с более высокими прочностными свойствами достигается большая степень локализации пластической деформации, приводящая к сосредоточению тепловой энергии в узкой околосшовной зоне и, как следствие, оплавлению за счет этого тепла менее прочного и менее тугоплавкого материала свариваемой пары.

Микротвердость бронзы в композите составляет 300 HV₁₀, что несколько превышает исходную (см. табл. 2). Микротвердость стали, как и в ранее рассмотренных композитах, составляет 500 HV₁₀. Можно отметить повышение микротвердости на 20-80 HV₁₀ в некоторых приконтактных областях бериллиевая бронза – мартенситно-стареющая сталь (рис. 9).

При испытаниях на изгиб расслоения не наблюдалось. Число знакопеременных изгибов до разрушения составило 10–12.



Spectrum 2	Spectrum 4
Fe 71,17	Fe 71,82
Cr 12,19	Cr 12,15
Ni 9,54	Ni 9,31
Co 3,60	Co 3,25
Mo 2,20	Mo 2,05
Ti 0,49	Ti 0,68
Al 0,47	Al 0,31
Spectrum 1; 3; 5	
Cu	100,00

Рисунок 7 - Продольное (а) и поперечное (б) сечения зоны соединения пятислойного композита из сплава БрБ2 и стали ЗИ90-ВИ

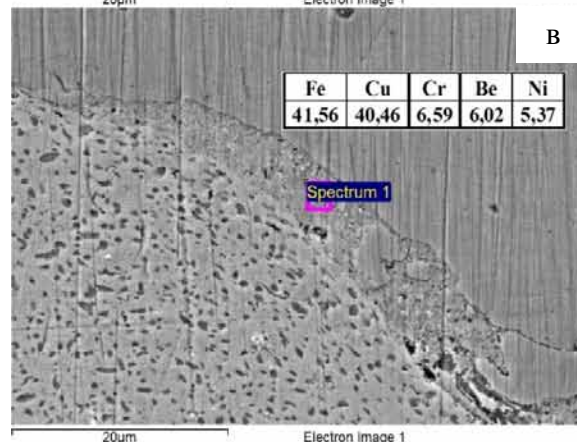
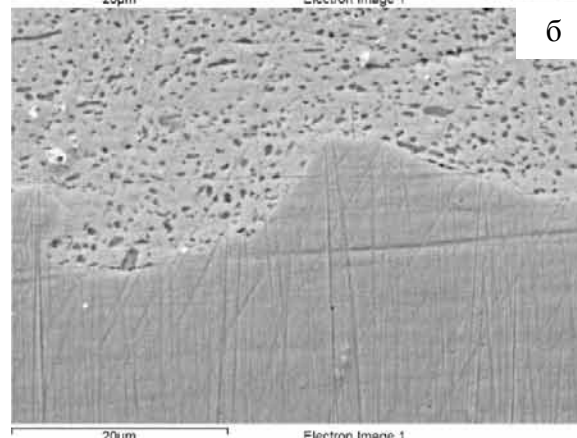
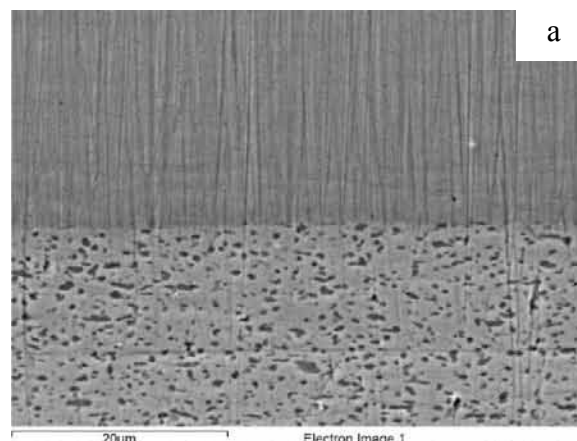


Рис. 8. Сканирующая электронная микроскопия во вторичных электронах и данные МРСА околошовной зоны пятислойного композита из сплава БрБ2 и стали ЗИ90-ВИ:

а, б – зоны интенсивной пластической деформации стали в мягкую бронзу; в – переходная зона и зона локального расплава вблизи ярко выраженной волнообразной границы раздела

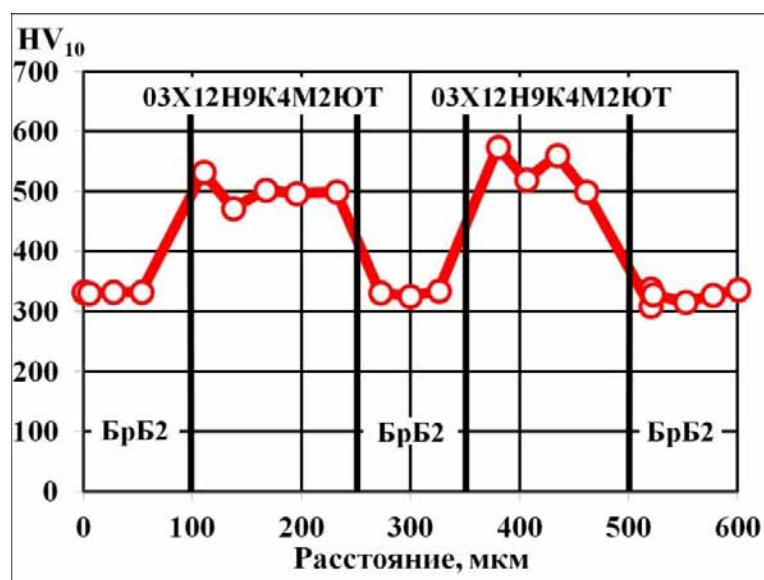


Рисунок 9 - Распределение микротвердости по поперечному сечению пятислойного композита из сплава БрБ2 и стали 3И90-ВИ

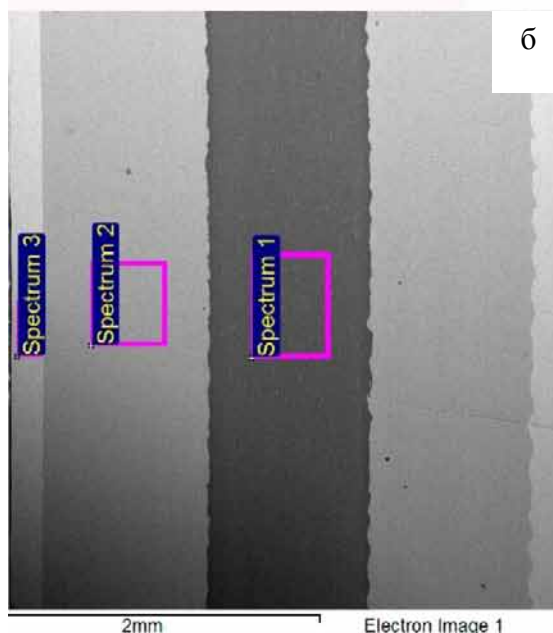
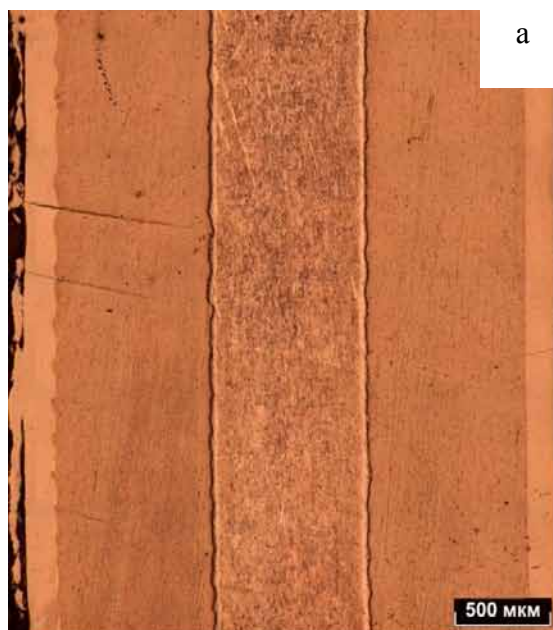
2.5. Пятислойный композит из стали 3И90-ВИ, сплавов ОТ4-1 и Д16

Вдоль всей границы раздела обеспечено хорошее соединение – без пор и несплошностей. Границы раздела имеют характерную для сварки взрывом слабую волнообразную форму (рис. 10). Волнообразный профиль со стороны удара характеризуется гораздо меньшими амплитудой и длиной волны, чем в рассмотренных ранее композитах.

Результаты рентгеноспектрального анализа переходной зоны титановый сплав–сталь показали, что в приконтактной зоне образовались тонкие ($\approx 1,0\text{--}2,0$ мкм) участки измененного химического состава (рис. 11, а, б, спектр 1). Вблизи границы раздела дюраль–титановый сплав также наблюдается зона перемешивания (рис. 11, в). Ее образование связано, по-видимому, с процессами локального расплавления и последующей кристаллизации, либо она является достаточно узкой зоной диффузионного перемещения атомов титана в сталь, что и приводит к некоторому понижению микротвердости в данной зоне (рис. 12).

Микротвердость дюрали составляет ≈ 200 HV₁₀, титанового сплава 300 HV₁₀, мартенситно-старееющей стали 500 HV₁₀. Механические свойства композита: $\sigma_B = 685$ МПа, $\sigma_{0,2} = 525$ МПа, $\delta = 9\%$.

При испытаниях на изгиб расслоения не наблюдалось. Число знакопеременных изгибов до разрушения составило 7–10 при сохранении вязкого разрушения во всех слоях композита.



Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3	
Al	92,42	Ti	97,36	Fe	70,70
Cu	5,61	Al	1,52	Cr	12,18
Mg	1,40	Mn	1,12	Ni	9,96
Mn	0,57			Co	3,68
				Mo	2,12
				Ti	0,62
				Al	0,46

Рисунок 10 - Микроструктура основных зон пятислойного композита из стали ЗИ90-ВИ, сплавов ОТ4-1 и Д16: а – сканирующая электронная микроскопия во вторичных электронах; б – растровая электронная микроскопия в обратно рассеянных электронах и данные МРСА

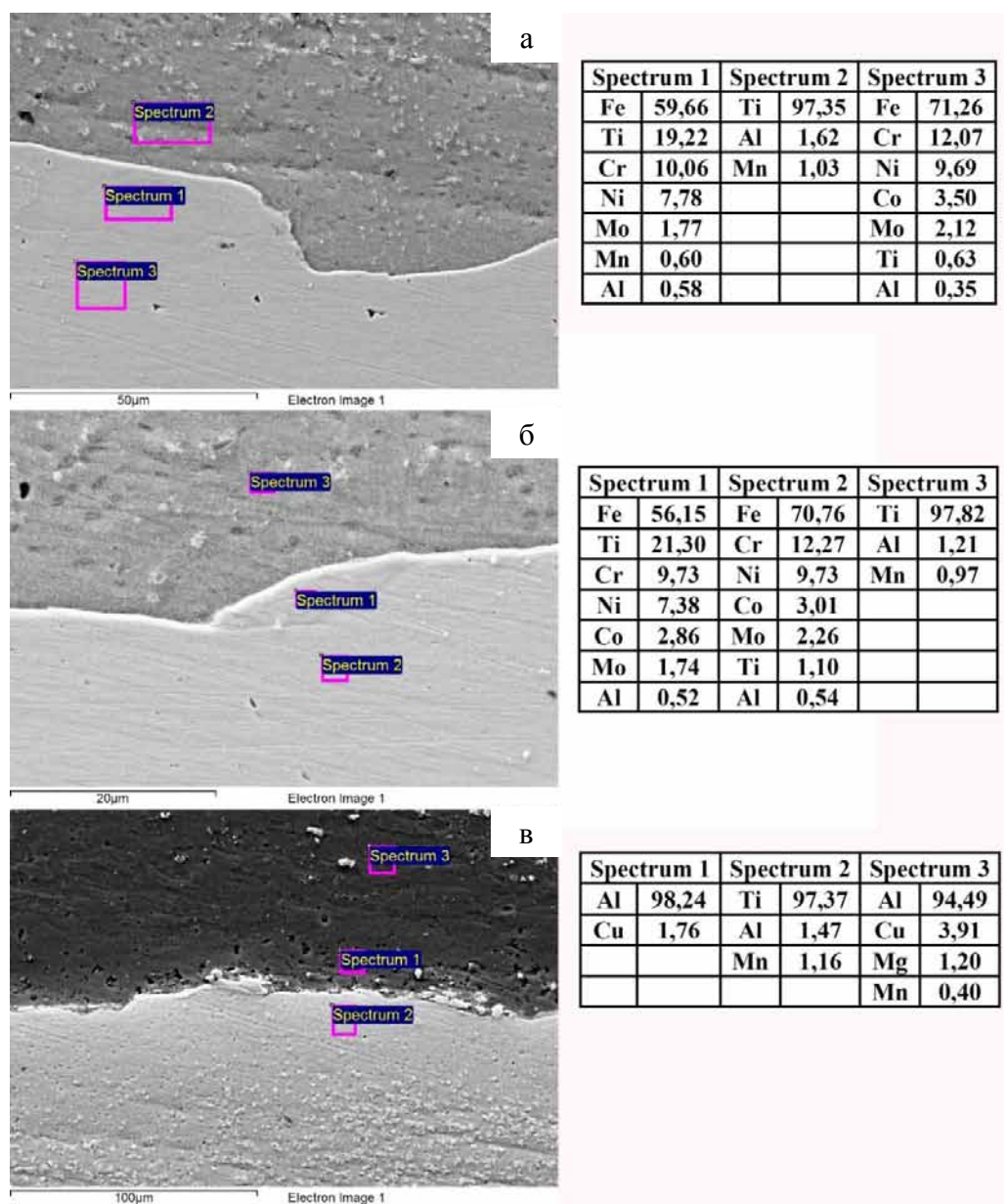


Рисунок 11 - Сканирующая электронная микроскопия во вторичных электронах и данные МРСА переходных зон на границах раздела сплав ОТ4-1–сталь ЗИ90-ВИ (а, б); сплав Д16–сплав ОТ4-1 (в)

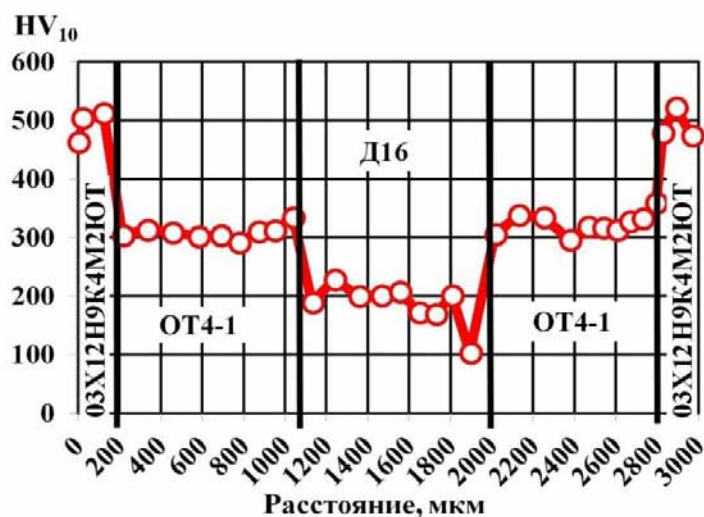


Рисунок 12 - Распределение микротвердости по поперечному сечению пятислойного композита из стали 3И90-ВИ, сплавов ОТ4-1 и Д16

Заключение

Методом сварки взрывом можно получать разнообразные биметаллические, многослойные и композиционные материалы с улучшенными прочностными, коррозионно-стойкими, жаропрочными и другими свойствами. Номенклатура материалов, сваренных взрывом, достаточно велика и постоянно расширяется и исследования в этом направлении являются весьма перспективной задачей. Объясняется это тем, что физико-механические свойства слоистых композитов позволяют резко улучшить эксплуатационные качества и технологичность различных машин и механизмов и расширить сферу их применения. Повышение прочностных и упругих свойств композиционных материалов позволяет существенно облегчить конструкции, а увеличение рабочих температур этих материалов даёт возможность повысить мощность двигателей, машин и агрегатов.

Сварка взрывом, как способ получения металлических слоистых композиционных материалов, благодаря её быстротечности позволяет получать равнопрочные соединения практически любых сочетаний металлов и сплавов площадью до десятков квадратных метров.

В исследованных многослойных композитах форма границы раздела не является причиной упрочнения, а является следствием природы соударения. В данной работе было обнаружено, что формирование волнообразной границы раздела сопровождается образованием областей интенсивного перемешивания в переходной зоне. Полученные результаты структурных исследований и механических испытаний свидетельствуют о высоком качестве сварного соединения тонколистовых материалов. При этом прочность полученных композитов превышает прочность исходных материалов.